

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ЕГО РЕСУРСА

¹Федяев В. Л., ¹Гун В. С., ¹Бакин А. А., ¹Сидоренко Н. Ю.

¹Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

e-mail: gounvs@susu.ru

Аннотация. В статье рассматривается замкнутая система регулирования частоты вращения асинхронного двигателя (АД), пропорционального регулятора и тиристорного преобразователя напряжения (ТПН). Разработана математическая модель регулирования частоты вращения АД, позволяющая снизить потери мощности в установившихся режимах и при допустимых параметрах переходных процессов для режимов холостого хода и малых нагрузок. Математическая модель АД с ТПН описывается в виде полиномиальных зависимостей от режимных параметров. Модель базируется на экспериментальных данных АД различной мощности. Разработана методика оценки эффективного использования электрической энергии в виде коэффициента мощности АД. Определен оптимизированный вариант формы регулировочной характеристики по критерию минимума затрат электрической энергии. Приведены экспериментальные и расчетные данные, даны практические рекомендации.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, пропорциональный закон регулирования, тиристорный преобразователь напряжения, коэффициент мощности, полиномиальные зависимости.

MATHEMATICAL MODEL OF SPEED CONTROL SYSTEM INDUCTION MOTOR WITH THE PURPOSE OF INCREASING ITS SERVICE LIFE

V. L. Fedyaev¹, V. S. Gune¹, A. A. Bakin¹, N. Y. Sidorenko¹

¹South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

e-mail: gounvs@susu.ru

Abstract. The article deals with a closed system speed control of induction motor (IM), proportional controller and thyristor voltage converter (TVC). A mathematical model of regulation speed of IM, which reduces losses power in steady-state conditions and with permissible parameters of transients for idling and low load. The mathematical model of IM with TVC is described in the form polynomial dependencies on the regime parameters. The model is based on experimental data of IM of different power. Developed by methodology for assessing effective use electrical energy in the form of a power factor IM. An optimized form is defined by the criterion minimum electrical energy costs. Are presented experimental and calculated data are given practical recommendations.

Key words: induction motor, proportional law of regulation, thyristor voltage converter, power factor, polynomial dependencies.

1. Введение

В современных условиях особенно острой становится проблема экономии электроэнергии при работе АД с переменной нагрузкой. Известно, что в АД при моментах

нагрузки на валу меньше номинального значения, за счет изменения амплитуды питающего напряжения постоянной частоты, можно получить минимум потерь, то есть обеспечить максимум коэффициента мощности двигателя [1].

Целесообразной областью применения АД с минимумом потребляемой мощности являются механизмы, работающие с переменной нагрузкой, в режиме «холостой ход – номинальная нагрузка». Для решения поставленной задачи, в случае двигателей малой и средней мощности, необходимо создать простую в употреблении, но достаточно точную математическую модель «Пропорциональный регулятор – АД – нагрузка». Математическая модель АД с ТПН для исследования установившихся и переходных процессов создана на основании полиномиальных зависимостей от режимных параметров. Модель базируется на экспериментальных данных АД различной мощности. В качестве примера реализации такой системы приводится система второго порядка с обратными связями по частоте вращения и току статора. Практически было установлено, что в такой системе, при рассчитанных коэффициентах статического регулятора частоты вращения и обратных связей, устойчивость находится в пределах инженерных требований.

2. Теоретическое обоснование

Для регулирования напряжения постоянной частоты находят применение ТПН. При исследовании пропорциональных систем управления с заранее заданной регулировочной характеристикой, то есть со стандартным пропорциональным регулятором напряжения, основной задачей является определение функций сигнала задания, передаточной функции ТПН и рабочих параметров АД.

Разработку и совершенствование системы автоматического регулирования частоты (САРЧ) вращения АД с ТПН целесообразно проводить расчетно-экспериментальным путем. Математическое описание САРЧ может весьма разнообразным. При расчетных исследованиях переходных процессов АД широко применяют системы линейных дифференциальных уравнений, описывающих элементы САРЧ. Следует заметить, что характерными переходными процессами являются процессы мгновенного наброса и сброса нагрузки. Они отличаются незначительными отклонениями (8–10 %) значений частоты вращения АД от ее значений на установившемся режиме. При исследовании таких режимов применение линейных моделей САРЧ дает достаточно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных. Хороший результат дает описание характеристик элементов САРЧ полиномиальными зависимостями на основании экспериментальных данных [2, 3, 4].

Предварительный эксперимент, проведенный в учебной лаборатории, позволил построить и проанализировать статические характеристики двигателя 4А80В6 в режимах холостого хода и малых нагрузок. Статические характеристики приведены в таблице 1: рассмотрены режимы холостого хода и малых нагрузок для оптимальных параметров настройки I_s – фазный ток статора – минимальный, φ – коэффициент мощности – максимальный, U_s – фазное напряжение статора, n – частота вращения ротора, P_1 – мощность, потребляемая из сети, P_2 – полезная мощность, M – момент, развиваемый двигателем. Работа двигателя при пониженном напряжении – устойчива.

Таблица 1

Испытание 4А80В6: $P_{\text{ном}} = 1,1$ кВт, $n_{\text{ном}} = 920$ мин⁻¹, режимы холостого хода и малых нагрузок при пониженном напряжении по критерию минимума тока статора (максимального коэффициента мощности)

M , Н·м	n , мин ⁻¹	U_s , В	I_s , А	α , град.	$\cos\varphi$	P_1 , кВт	P_2 , кВт
0,15	975	44	0,52	108	0,65	23	15
0,55	970	49,8	0,7	102,5	0,78	71	56
0,75	967,5	51,1	0,8	101,2	0,78	97	76
0,8	965	52,5	0,88	100	0,77	105	81
1,25	960	55,2	1,03	97,5	0,78	161	126
1,41	957,5	56,6	1,13	96,25	0,77	184	142
1,58	955	58	1,18	95	0,77	204	157
1,88	950	58,5	1,3	94,5	0,76	245	187
2,0	947,5	58,8	1,38	94,25	0,75	264	199
2,23	945	59,1	1,45	94	0,74	268	198
2,39	942,5	66,3	1,5	87,5	0,75	315	236
2,55	940	74,5	1,55	80	0,75	293	219
2,83	935	90,3	1,68	65	0,74	331	245
3,18	930	92	1,83	63,33	0,72	428	310
3,53	925	93,6	1,95	61,67	0,72	478	342
3,9	920	95,3	2,1	60	0,70	535	376

По результатам испытаний, при известных допущениях ТПН в пределах рабочих характеристик ($M_{\text{хх}} - M_{\text{ном}}$) АД, был определен рабочий диапазон угла регулирования СИФУ, лежащий в пределах 60–90 градусов. Напряжение на выходе ТПН в зависимости от α , определяется как:

$$U_d = 160 - 1,067\alpha.$$

Зависимость $U_d(\alpha)$, (где $U_d = U_s$) построенная по экспериментальным данным, представлена на рис. 1.

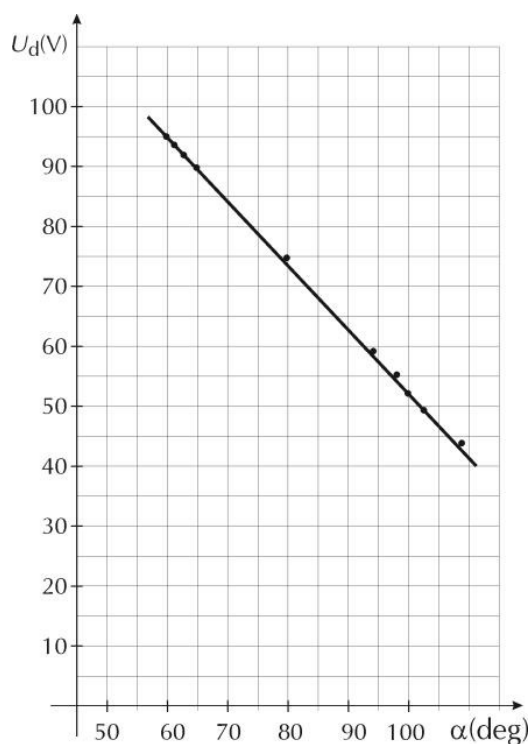


Рис. 1. Напряжение на выходе ТПН в зависимости от угла регулирования СИФУ – α

Функциональные зависимости экспериментальных данных исследуемого двигателя были описаны полиномиальными зависимостями второго порядка.

Для определения функции сигнала задания $U_{\text{set}}(n)$ и критерия качества – коэффициента мощности, были построены линейные зависимости.

Для определения коэффициентов полиномов, аппроксимирующих заданный массив исходных точек, была написана программа аппроксимации на языке FORTRAN. Приемлемая точность описания полиномами заданных массивов исходных данных достигалась проверкой результатов вычислений в контрольных точках. Полиномиальная зависимость второй степени для крутящего момента M от частоты вращения вала двигателя n , напряжения тиристорного источника питания U_s , тока, потребляемого от источника питания I_s , угла регулирования СИФУ a :

$$M(n, U_s, I_s, a) = 55,719n - 322,205U_s + 1040,842I_s - 376,986a - 0,008n \times U_s - 1,435n \times I_s + 0,010n \times a + 1,965U_s \times I_s + 2,229U_s \times a + 2,694I_s \times a - 0,029n \times n + 0,999U_s \times U_s - 16,147I_s \times I_s + 1,241a \times a.$$

Линейная зависимость:

$$M(n, U_s, I_s, a) = -0,0161n + 0,0964U_s + 1,6638I_s + 0,0988a.$$

Полиномиальная зависимость коэффициента мощности от тех же параметров запишется как:

$$\begin{aligned} \cos\varphi(n, U_s, I_s, a) = & 20,479n - 119,793U_s + 431,381I_s \\ & - 137,940a + 0,012n \times U_s - 0,638n \times I_s + 0,019n \times a \\ & + 1,122U_s \times I_s + 0,727U_s \times a + 1,401I_s \times a - 0,012n \times a \\ & + 0,329U_s \times U_s - 8,571I_s \times I_s + 0,401a \times a. \end{aligned}$$

Линейное приближение примет вид:

$$\cos\varphi(n, U_s, I_s, a) = 0,011n - 0,061U_s + 0,385I_s - 0,065a.$$

Напряжение на обмотке статора при устойчивой работе двигателя и при минимальном токе статора и оптимальном коэффициенте мощности запишется как:

$$\begin{aligned} U_s(n, M, I_s, a) = & 0,704n + 3278,201M - 7056,682I_s \\ & + 29,971a - 0,001n \times n - 68,340M \times M - 106,666I_s \times I_s \\ & - 0,0003a \times a - 3,417n \times M + 7,344n \times I_s - 0,032n \times a \\ & + 197,015M \times I_s - 0,355M \times a - 0,174I_s \times a. \end{aligned}$$

Линейное приближение имеет вид:

$$U_s(n, M, I_s, a) = 0,163n + 1,9622M + 1,1727I_s - 1,0749a.$$

Ток, потребляемый из сети для оптимального коэффициента мощности, запишется как:

$$\begin{aligned} I_s(n, M, U_s, a) = & -30,681n - 435,947M + 181,552U_s \\ & + 205,114a + 0,016n \times n + 3,267M \times M - 0,554U_s \times U_s \\ & - 0,6561a \times a + 0,465n \times M - 0,0030n \times U_s - 0,011n \times a \\ & - 0,042M \times U_s - 0,163M \times a - 1,206U_s \times a. \end{aligned}$$

Линейное приближение будет иметь вид:

$$I_s(n, M, U_s, a) = -0,0021n + 0,4147M + 0,0144U_s + 0,0177a.$$

Момент сопротивления потребителя описывался выражением:

$$M_c = k_c \times n,$$

где k_c – коэффициент пропорциональности настройки потребителя.

Оценка влияния пониженного напряжения на динамические показатели АД проведена с использованием разработанной математической модели САРЧ АД. В разработанной модели дифференциальные уравнения наиболее значимых элементов САРЧ используются в следующем виде [5]:

$$(T_{IM} \times p + 1) \times M = k \times (w_0 - w), M - M_c = p \times w / J_s,$$

где J_s – суммарный момент инерции АД с приводом; T_{IM} – электромагнитная постоянная времени АД; k – модуль жесткости линеаризованной механической характеристики; w_0 – синхронная частота вращения; w – текущая частота вращения.

Первое уравнение описывает линейную механическую характеристику АД в рабочей зоне, где скольжение s изменяется в диапазоне от 0 до $s_{кр}$. Второе уравнение представляет собой жестко приведенное механическое звено.

На основании экспериментальных данных были приняты следующие допущения:

- основные функциональные зависимости были описаны полиномами второго порядка;
- предполагается, что вентили – это однооперационные тиристоры, у которых можно управлять лишь включением. Выключение тиристора происходит программным путем при выполнении условия падения тока, текущего в данный момент через тиристор до нуля;
- при расчете тиристор рассматривается как идеальный вентиль, временем переключения которого можно пренебречь ($t_n < 0,006$ с);
- также пренебрегаем падением напряжения на открытом тиристоре ($U < 1,5\%$ максимального напряжения включения). Следовательно, ТПН можно представить усилительным звеном;
- АД представляется апериодическим звеном второго порядка [5];

Предлагаемый критерий качества – коэффициент мощности – также записывается в виде полинома второго порядка в зависимости от параметров двигателя и нагрузки.

Датчики режимных параметров описываются алгебраическими уравнениями:

$$U_{bfw} = k_{bfw} \times w, U_{bfi} = k_{bfi} \times I_s$$

без учета дискретности в съеме сигнала [1].

Роль статического регулятора частоты вращения выполняет СИФУ с коэффициентом передачи δ (тангенс угла наклона пилообразного сигнала), численно равным обратной величине коэффициента усиления.

Величины δ , k_{bfw} , k_{bfi} выбираются по результатам анализа и синтеза, исходя из обеспечения заданных динамических свойств контура [6,7,8,9].

Структурная схема, удовлетворительно описывающая переходные процессы в АД при питании его от ТПН, представлена на рис. 2.

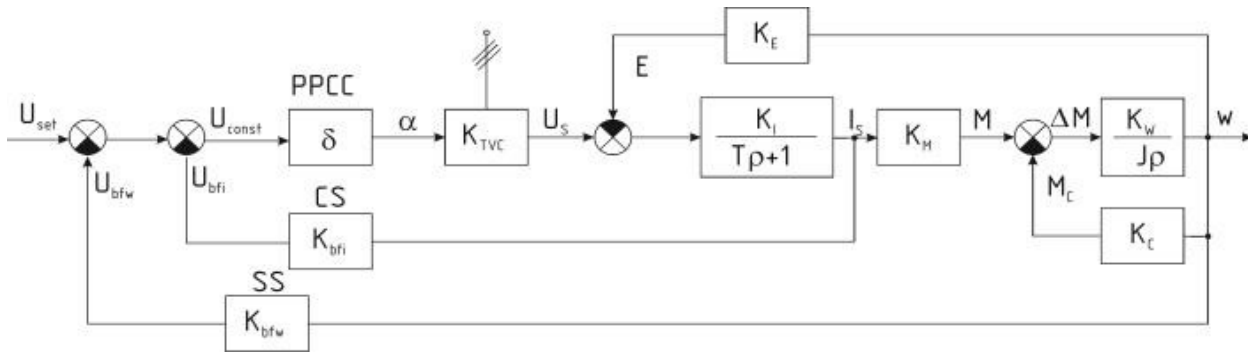


Рис. 2. Структурная схема САРЧ АД: TCV – тиристорный преобразователь, SS – датчик частоты вращения, CS – датчик тока, AFCS – схема импульсно-фазового управления

Дифференциальные уравнения, описывающие контур управления частотой вращения АД в переходном процессе ($M_{xx} - M_{ном}$; $M_{ном} - M_{xx}$) примут вид:

$$(L_1/R_1) \times p J_s = (U_{set} - k_{bfi} \times J_s - k_{bfiw} \times w - k_e \times w)/R_1, p \times w/J_s = M - M_c,$$

где L_1 – полная индуктивность обмотки статора; R_1 – активное сопротивление обмотки статора; U_{set} – сигнал задания по частоте вращения; k_e – коэффициент, учитывающий внутреннюю паразитическую обратную связь по частоте вращения; J_s – суммарный момент инерции АД и нагрузки. Поскольку система является системой второго порядка, то для обеспечения устойчивости вводятся две обратные связи: по току и частоте вращения: k_{bfi} и k_{bfiw} – коэффициенты обратных связей по току и частоте вращения соответственно.

Используя теорию модального управления, были проведены исследования на устойчивость работы замкнутого контура и выбраны параметры $\delta = 1$, $k_{bfi} = 2$, $k_{bfiw} = 1$ [11].

Задача САРЧ – оптимальное функционирование управляемой системы при наличии внешней нагрузки, как правило, случайной. Значения параметров АД и ТПН, входящих в правые части уравнений, в соответствии с рекомендациями работ [2, 3, 4], определялись в виде вышеприведенных функциональных зависимостей.

Величина сигнала задания по частоте вращения U_{set} выбирается по экспериментальной характеристике, исходя из условия: минимума тока холостого хода и малых нагрузок (максимум коэффициента мощности) при сохранении устойчивой работы АД. Тогда сигнал управления будет иметь вид:

$$U_{cs} = U_{set} - U_{bfiw} - U_{bfi}.$$

Сигнал управления U_{cs} сравнивается в СИФУ с пилообразным сигналом (см. рис. 3).

Для проверки результатов теоретических исследований работы САРЧ в соответствии с критериям минимального тока статора и максимума коэффициента мощности в учебной лаборатории Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ) была создана экспериментальная установка, включающая ТПН с вертикальным законом управления тиристорами, трехфазный АД типа 4А80В6 ($P_{ном} = 1,1$ кВт, $n_{ном} = 920$ мин⁻¹). АД питается переменным напряжением 127В и при номинальной частоте вращения потребляет ток $I_n = 2,1$ А, который в дальнейших рассуждениях условно будет считаться номинальным.

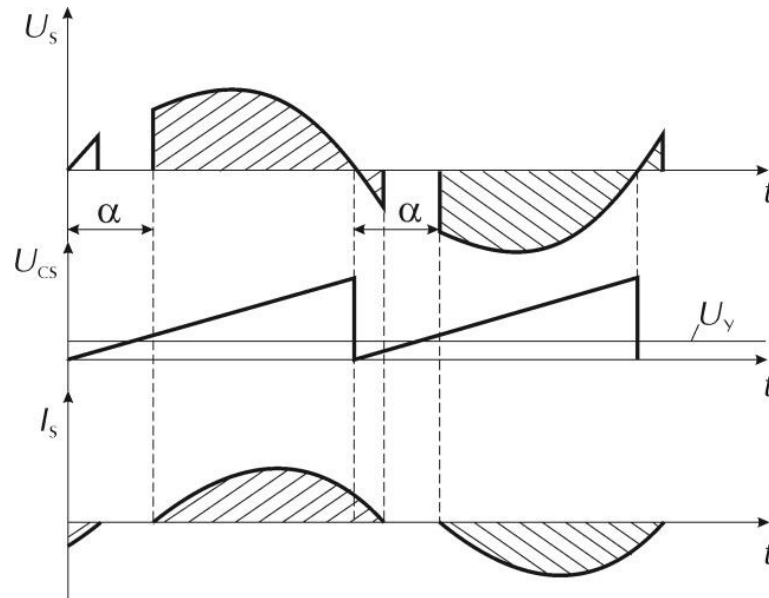


Рис. 3. Временные диаграммы работы разомкнутого контура

В качестве нагрузки использован двигатель постоянного тока (ДПТ) с параллельным возбуждением типа 2ПН100МГУХЛ4 ($P_H = 0,75 \text{ кВт}$, $I_H = 8,7 \text{ А}$). Вал ДПТ механически соединен с валом АД. Датчиком частоты вращения служит тахогенератор типа ТС-1МУХЛ4, закрепленный на валу ДПТ. Датчиками тока являются трансформаторы тока типа УТТ-5М ($I_{1H} = 15 \text{ А}$, $I_{2H} = 5 \text{ А}$).

Схема экспериментальной установки показана на рис. 4.

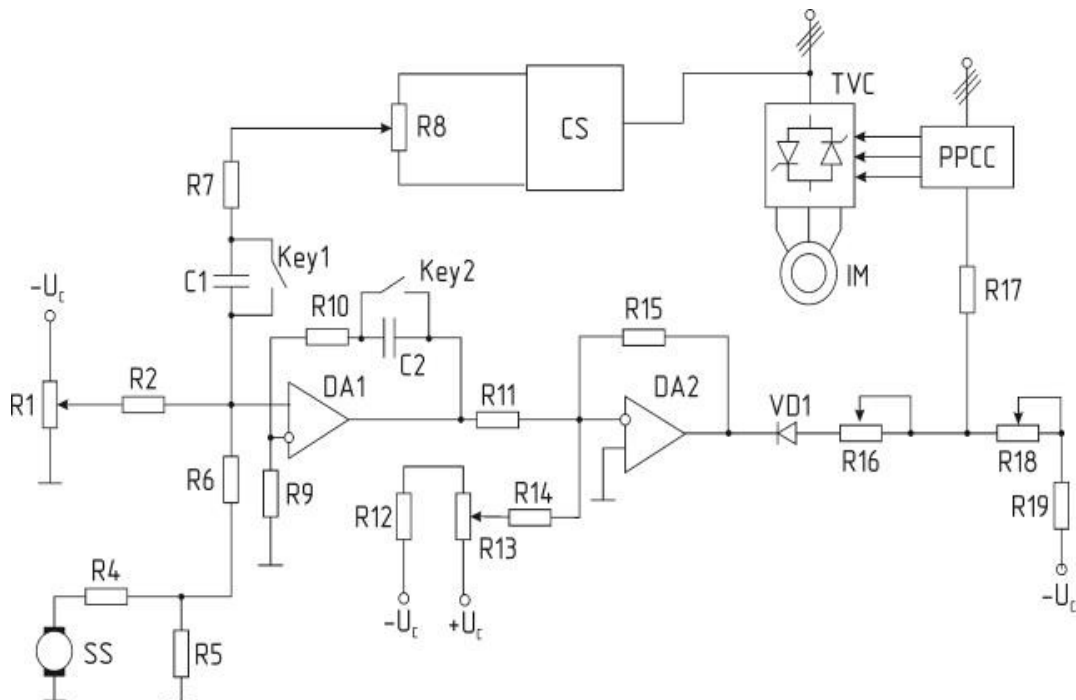


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: где U_c – источник постоянного напряжения. Сигнал задания по частоте вращения через R2 сравнивается с сигналом обратной связи, поступающим с тахогенератора SS через R6 к инвертирующему входу операционного усилителя DA1

Сюда же с датчика тока CS через R8, R7, C1 поступает сигнал отрицательной обратной связи по току статора. Когда ключ Key1 замкнут, то на вход DA1 поступает сигнал обратной связи по току, содержащий постоянную и переменную составляющие, что в конечном итоге приводит к уменьшению коэффициента усиления. Поэтому

предлагается ввести в цепь обратной связи по току конденсатор С1 (ключ Key1 разомкнут), который пропускает только переменную составляющую на вход DA1. Переменным резистором R8 осуществляется регулирование глубины отрицательной обратной связи по току для достижения устойчивой работы системы.

Ключ Key2 позволяет реализовать статический (когда ключ Key2 замкнут) и астатический (когда ключ Key2 разомкнут) регуляторы частоты вращения АД. На операционном усилителе DA2 выполнен компаратор, на выходе которого – импульсы отрицательной величины, проходящие через диод VD1 на резисторы R16, R18.

Эти резисторы используются для выбора диапазона углов регулирования тиристорами. Угол α_{\max} устанавливается переменным резистором R16. Угол α_{\min} выбирается резистором R18 с учетом ограничения величины управляющего сигнала, поступающего в СИФУ на величину, равную углу запаздывания тока статора относительно питающего напряжения. Экспериментальным путем α_{\min} найдена равным 60° .

Проводился анализ динамических свойств рассматриваемых контуров регулирования, используя метод корневого годографа. Согласно теории модального управления [11], определенная неустойчивость обусловлена структурой самого контура. Для устранения этой неустойчивости необходимо ввести дополнительные обратные связи: отрицательная обратная связь по току статора. Сигнал управления сравнивается в СИФУ с пилообразным сигналом.

Практически реализована субоптимальная система управления АД по критериям минимума тока статора и максимума коэффициента мощности.

Изложенная выше теория и практические рекомендации были проверены в учебной лаборатории электрических машин ЮУрГУ на двигателе АОК2-51- 6-Т2 (параметры: 220/380 В, 16/10 А, 4 кВт, 955 мин⁻¹, КПД = 82%, cosφ = 0,78). В качестве нагрузки был использован ДПТ типа 2ПН160МУХЛ4 (параметры: 220В, 4,5кВт, 24,2А, 1000/3000 мин⁻¹), механически соединенный с АД и работающий в режиме электромагнитного тормоза.

Питание АД осуществлялось с помощью напольного индукционного регулятора напряжения типа ИР 59/22-У3 (параметры: 160 кВА, 380В, пределы регулирования напряжения 0 – 380 В, ток сети 310А, ток нагрузки 245А).

Результаты проведенных испытаний помещены в таблицы 2: (испытание АОК2-51-6-Т2: $P_{\text{ном}} = 4\text{ кВт}$, $n_{\text{ном}} = 955\text{ мин}^{-1}$, режим холостого хода) и 3 (испытание АОК2-51-6-Т2: $P_{\text{ном}} = 4\text{ кВт}$, $n_{\text{ном}} = 955\text{ мин}^{-1}$, режим малых нагрузок при выполнении условий минимума тока статора и максимума коэффициента мощности).

Таблица 2

Испытание АОК2-51-6-Т2: $P_{\text{ном}}=4\text{ кВт}$, $n_{\text{ном}} = 955\text{ мин}^{-1}$, режим холостого хода

$U_s, \text{ В}$	$I_s, \text{ А}$	$P_s, \text{ кВт}$	$Q, \text{ кВА}$	$\cos\varphi$	$n, \text{ мин}^{-1}$	$P_{\text{мех}}, \text{ кВт}$	$S, \text{ ВА}$
1	2	3	4	5	6	7	8
219	2,5	0,32	0,89	0,34	996	3,14	951
200	2,29	0,30	0,74	0,37	995	3,14	795
180	2,17	0,27	0,60	0,40	994	3,13	677
141	1,75	0,22	0,36	0,52	989	3,12	427
121	1,65	0,20	0,27	0,59	985	3,10	345
110	1,63	0,19	0,23	0,61	981	3,09	311
100	1,53	0,19	0,19	0,72	975	3,07	265
91	1,53	0,18	0,16	0,75	969	3,05	240
80	1,55	0,17	0,13	0,79	959	3,02	215

$U_s, \text{В}$	$I_s, \text{А}$	$P_1, \text{кВт}$	$Q, \text{кВА}$	$\cos\varphi$	$n, \text{мин}^{-1}$	$P_{\text{mec}}, \text{кВт}$	$S, \text{ВА}$
1	2	3	4	5	6	7	8
70	1,63	0,17	0,11	0,86	944	2,97	198
60	1,8	0,16	0,09	0,85	919	2,89	188
51	2,13	0,16	0,09	0,85	866	2,70	187

Таблица 3

Испытание АОК2-51-6-Т2: $P_{\text{ном}} = 4 \text{ кВт}$, $n_{\text{ном}} = 955 \text{ мин}^{-1}$, режим малых нагрузок

$U_s, \text{В}$	$I_s, \text{А}$	$M, \text{Нм}$	$n, \text{мин}^{-1}$	$Q, \text{кВА}$	$P_{\text{mec}}, \text{кВт}$	$\cos\varphi$
95,3	1,54	0,01	970	0,175	0,196	0,77
94,7	1,80	0,11	973	0,18	0,24	0,813
94,3	1,92	2,0	955	0,18	0,26	0,83
93,6	2,21	3,32	942	0,19	0,30	0,84
93,0	2,42	4,22	931	0,20	0,34	0,87
92,5	2,82	6,06	914	0,21	0,39	0,86
92,0	2,95	8,17	906	0,22	0,41	0,87

3. Выводы

1. Был разработан практический вариант и математическая модель субоптимальной системы управления АД по критериям минимума тока статора и максимума коэффициента мощности, работающая при постоянном сигнале задания по частоте вращения со статическим регулятором. В качестве преобразователя переменного напряжения использовались ТПН и ИР.

2. Сигнал задания по частоте вращения выбирался, исходя из условия обеспечения минимума тока статора АД на холостом ходу и режимах малых нагрузок (или близких к ним значениях). Построена зависимость сигнала напряжения задания от основных режимных параметров.

3. Статический регулятор частоты вращения обеспечивает при моментах нагрузки меньших номинальной работу АД на регулировочной характеристике, аппроксимирующей кривую оптимальной.

4. Оценка влияния регулировочной характеристики на основные показатели АД описана полиномами второй степени.

5. С помощью экспериментальной установки в лаборатории электрических машин ЮУрГУ реализован практический вариант субоптимальной системы управления АД по критерию минимума тока статора на примере трехфазного АД типа 4А80В6. Экспериментальные исследования системы со статическим регулятором показали, что удастся снизить ток статора АД на: 43 % при $M_c = 0$; 33% при $M_c = 0,2M_{\text{ном}}$; 20 % при $M_c = 0,4M_{\text{ном}}$; 9 % при $M_c = 0,6M_{\text{ном}}$; 4 % при $M_c = 0,8M_{\text{ном}}$ по сравнению с работой АД при тех же значениях моментов нагрузки на естественной характеристике.

6. Исследования субоптимальной системы управления АД типа 4А80В6 по критерию минимума тока статора с астатическим регулятором показали, что если при моментах нагрузки $M_c = 0,8M_{\text{ном}}$ и $M_c = 0$ токи статора АД при работе с астатическим и статическим регуляторами практически совпадают, то при $M_c = 0,6M_{\text{ном}}$ ток статора АД, управляемого от субоптимальной системы с астатическим регулятором на 4 %, при $M_c = 0,4M_{\text{ном}}$ – на 10 %, при $M_c = 0,2M_{\text{ном}}$ – на 14 % больше, чем при статическом регуляторе.

7. В результате исследования характера электромеханических характеристик (зависимость $I_s - n$) работы АД, управляемого от ТПН или ИР, было выявлено, что каждой

точке оптимальной кривой, соответствующей минимальным значениям тока статора и максимума коэффициента мощности, при постоянных моментах нагрузки, соответствует частота вращения в пределах от номинальной до холостого хода. Следовательно, линеаризованная оптимальная регулировочная характеристика позволяет использовать стандартный ТПН в качестве статического регулятора.

Список литературы

1. Бакин, А.А. Дискретная субоптимальная система управления асинхронным двигателем по критерию минимума тока статора: дисс ... канд. техн. наук / А.А. Бакин. – Челябинск, 1996.
2. Марков В.А. Улучшение экономических и экологических показателей транспортных дизелей путем управления процессом топливоподачи: дисс ... докт. техн. наук. – М., 1995.
3. Попов Е.П. Теория нелинейных систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1988. – 256 с.
4. Макаров Е.Г. Инженерные расчеты в MathCAD: Учебный курс. – СПб.: Изд-во «Питер», 2005. – 448 с.
5. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
6. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 1994. – 265 с.
7. Гладышев, С.П., Чугаев, В.В., Бакин, А.А. Анализ и синтез динамических свойств контура тока асинхронного двигателя с помощью разностных уравнений. // Тез. докл. Международной научно-технической конференции по преобразовательной технике. Новосибирский электротехнический институт. – Новосибирск, 1994.
8. Гладышев, С.П., Бакин, А.А., Гладышев, П.С. Цифровое моделирование тиристорного регулятора частоты вращения асинхронного двигателя. – М.: 1994 – Рукопись деп. в Информприбор, № 5163 – А.
9. Гладышев, С.П., Бакин, А.А., Гладышев, П.С. Уменьшение тока холостого хода асинхронного двигателя с помощью тиристорного коммутатора. – М.: 1994 – Рукопись деп. в Информприбор, № 5176 – В.
10. Гладышев, С.П., Бакин, А.А., Гладышев, П.С. Исследование устойчивости тиристорного регулятора частоты вращения асинхронного двигателя на цифровой модели. – М.: 1994 – Рукопись деп. в Информэлектро, № 45 – эт 94.
11. Gladyshev, S.P., Bakin, A.A., Gladyshev, P.S. The dynamic of the control loops of the alternating voltage thiristor converter. // Int. Conf. – The dynamic of the non-lenear systems. The Trinity College, Dublin, Ireland, 1995.